

Раздел II. Моделирование и алгоритмы обработки информации

УДК 621.315.3: 621.316.99

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-86-98

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович

ОДНОФАКТОРНЫЙ ЭКСТРОПОЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗОЛЯЦИИ СКЛ

Статья посвящена проблеме прогнозирования остаточного ресурса силовых кабельных линий (СКЛ) по данным мониторинга его тепловых характеристик. А именно математического описания данных послойного мониторинга температурных зависимостей силового кабеля: АПв Пу г-1х30/25-10. Проведены исследования изменения значений температурных полей силового кабеля в различных режимах его работы и нагрузки, а также внешние факторы (температура, влажность и т.п.). В статье рассмотрены подходы к прогнозированию остаточного ресурса, применяемые при эксплуатации СКЛ и их техническом освидетельствовании. Результатом проведенного сравнения проведен выбор метода прогнозирования, учитывая, что точность прогноза зависит от того какой закон используется. Рассматривается метод прогнозирования термофлуктуационных процессов с аппроксимацией зависимостей тепловых процессов в изоляции силового кабеля. Показано, что использование современных методов оценки степени поврежденности СКЛ и теории надежности позволяет выявить дополнительные резервы остаточного ресурса и оценить его с требуемой достоверностью. Проведено моделирование теплопереноса жилы СКЛ различными функциями. Получены аналитические зависимости, основанные на анализе термофлуктуационных процессов для расчета рациональных параметров электротехнических устройств контроля технического состояния изоляционных материалов (ИМ) СКЛ под нагрузкой, учитывающие характеристики температуры изоляционных материалов. Из трех рассмотренных аппроксимирующих зависимостей (экспоненциальная функция, линейная функция и полином 1-й степени), лучшие статистические показатели демонстрирует экспоненциальная функция. Показано, что в качестве аппроксимирующей прогнозирующей функции для исследования термофлуктуационных процессов наиболее эффективным является применение степенной функции, обеспечивающую требуемую точность и автоматизацию. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик и выбор оптимальной прогнозирующей функции распределения температурных полей в СКЛ. Для решения задачи экстраполяции определены аналитические зависимости описывающие термофлуктуационные процессы в СКЛ. Использование предлагаемого подхода позволяет реализовать устройства измерения тепловых процессов изоляции, учитывающие влияние внешних факторов на процесс измерения и ускоряющие процесс измерения.

Теория тепловых процессов; экстраполяционные методы прогнозирования; изоляционные материалы; пропускная способность; надежность систем энергоснабжения.

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich

EXTRAPOLATION UNIVARIATE FORECASTING METHOD THERMALFLUCTUATION PROCESSES OF ISOLATION OF SKL

The article is devoted to the problem of predicting the residual life of power cable lines (PCL) according to the monitoring of its thermal characteristics. Namely, the mathematical description of the data of layer-by-layer monitoring of the temperature dependences of the power

cable: APA Pu g-1x30 / 25-10. Studies of changes in the temperature fields of the power cable in various modes of its operation and load, as well as external factors (temperature, humidity, etc.), have been carried out. The article discusses approaches to predicting the residual resource used in the operation of the PCL and their technical certification. The result of the comparison carried out is the selection of the method of forecasting, given that the accuracy of the forecast depends on which law is used. A method for predicting thermal fluctuation processes is considered with approximation of the dependences of thermal processes in the insulation of a power cable. It is shown that the use of modern methods of assessing the degree of damage to the PCL and the theory of reliability allows us to identify additional reserves of residual resource and evaluate it with the required reliability. The modeling of heat transfer of the PCL core with various functions was carried out. Analytical dependencies are obtained based on the analysis of thermal-fluctuation processes for calculating rational parameters of electrical devices for monitoring the technical state of insulation materials (IM) of PCL under load, taking into account the temperature characteristics of insulating materials. Of the three approximating dependencies considered (exponential function, linear function, and 1st degree polynomial), the exponential function demonstrates the best statistics. It is shown that, as an approximating predictor function for studying thermal-fluctuation processes, the use of a power-law function that provides the required accuracy and automation is most effective. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics and the selection of the optimal predictive function of the distribution of temperature fields in the PCL are carried out. To solve the problem of extrapolation, the analytical dependences describing the thermal fluctuation processes in the PCL are determined. Using the proposed approach allows you to implement devices for measuring thermal insulation processes, taking into account the influence of external factors on the measurement process and accelerating the measurement process.

Theory of thermal processes; extrapolation prediction methods; insulation materials; throughput; reliability of power supply systems.

Введение. Основой надежной эксплуатации силовых кабельных линий является прогнозирование изменения его состояния [1–6]. Знание состояния позволяет предотвратить аварийные ситуации благодаря своевременной замене элементов, выработавших ресурс [7]. В основе прогнозирования времени безотказной работы СКЛ лежит модель выработки ресурса при различных режимах эксплуатации [8–9]. При выборе математического аппарата для решения задачи аналитического прогнозирования предварительно были определены диагностические параметры.

При оценке пропускной способности в задачах мониторинга теплового режима необходимо анализировать температуру жилы в режиме реального времени и своевременно предотвращать токовые перегрузки СКЛ [10, 11]. Для выполнения этих задач требуется производить расчёты температуры в динамике, а для своевременного предотвращения токовых перегрузок требуется прогнозирование температур жил кабелей в режиме реального времени. Последнее означает, что необходимо постоянно прогнозировать нагрев кабелей на некоторое время вперёд, причем такое, чтобы была возможность принять меры по снижению нагрузки КЛ.

Температура является одним из основных факторов, определяющих износ и разрушение изолирующих материалов. Если температура приближается к максимально допустимой, то начинается процесс интенсивного теплового износа изолирующего материала, ее тепловое старение. В результате может произойти тепловой пробой изолирующего материала. Анализ распределения температуры жилы дает возможность выявления и прогнозирования всех термических процессов, происходящих в линии, что позволяет более рационально использовать кабельные ЭС при различных режимах работы.

В работах [12] представлены модели, позволяющие рассчитывать распределение температуры по слоям, а также зависимость, позволяющая определять температуру жилы ($\theta_{ж}$, °C), влияющую на выбор сечения и пропускную способность СКЛ. Таким образом встает задача выбора оптимальной прогнозирующей функции распределения температурных полей в СКЛ.

Выбор метода прогнозирования. Выбор метода прогнозирования остаточного ресурса зависит от характера преобладающего процесса деградации (изнашивания, усталости, и др.) а также от необходимой точности и достоверности прогноза. При невысоких требованиях к точности и достоверности применяют упрощенные методы, в случае необходимости гарантированных оценок используют уточненные методы, в том числе базирующиеся на теории надежности.

Прогнозировать остаточный ресурс можно при одновременном выполнении следующих условий: известны параметры, определяющие техническое состояние оборудования и критерии предельного состояния оборудования; имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений. По многим характерным для энергетического оборудования процессам деградации указанные условия выполняются. По некоторым видам повреждений (например, образованию включений, дендритов) не все необходимые условия могут выполняться; в таких случаях для прогнозирования остаточного ресурса требуется проведение специальных исследований. Прогнозировать остаточный ресурс можно, когда:

- ◆ предельным состоянием силовой кабельной линии, работающей с предельными режимными параметрами, является увеличение температуры изоляционного материала до критического значения. При эксплуатации периодически осуществляют контроль температуры изоляции;

- ◆ предельным состоянием силовой кабельной системы является снижение сопротивления изоляции, в результате чего сквозной ток достигает предельно допустимой величины $I_{КЗ}$. При эксплуатации проводят непрерывный контроль тока. В основе методов прогнозирования технического состояния СКЛ лежат работы многих ученых.

В настоящее время можно выделить следующие основные методы прогнозирования:

- ◆ интуитивные или экспертные (обобщение и статистическая обработка мнений экспертов);

- ◆ формализованные:

- а) методы моделирования (используются физические, физико-математические и информационные модели на базе теории подобия);

- б) статистические методы (основаны на экстраполяции и интерполяции прогнозируемых параметров надежности на базе закономерности изменения параметров надежности во времени).

Интуитивные методы используются в случаях, когда устройство имеет простую конструкцию или слишком сложно, что невозможно учесть все параметры. Используют мнения экспертов, как одиночные, так и групповые. Полученные экспертные оценки и будут являться конечным прогнозом.

Формализованные методы можно разделить на следующие подгруппы:

- ◆ экстраполяционные (методы вероятностного моделирования, наименьших квадратов, адаптивного сглаживания, экспоненциального сглаживания);

- ◆ системно-структурные (морфологического анализа, структурной аналогии, функционально-иерархическое и сетевое моделирования, матричный);

- ◆ ассоциативные (имитационное моделирование, историко-логический анализ);

- ◆ методы опережающей информации (анализ патентной информации и потоков публикаций, оценка значимости изобретений).

Прогнозирование остаточного ресурса оборудования обычно осуществляют по схеме, приведенной на рис. 1.

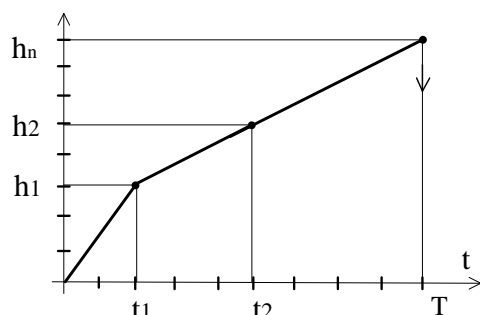


Рис. 1. Тепловая схема прогнозирования ресурса силового оборудования

Через определенные периоды эксплуатации $t_1, t_2 \dots$ измеряют максимальные значения возникших повреждений (износа, нагрев, образование включений) $h_1, h_2 \dots$ и экстраполируют зависимость до предельно допустимого значения повреждений h_n . Это позволяет получить достаточно точные оценки остаточного ресурса, если известен вид зависимости $h(t)$ и при измерениях h можно определить максимальные значения повреждений, т.е. осуществить сплошной контроль элементов силовой кабельной системы.

Показанная на рисунке зависимость $h(t)$ характерна для различных разрушений. Для некоторых видов деградации и старения (нагревом, образованием включений) указанная зависимость линейная: $h(t) = h_0 + C \cdot t$, где h_0 и C – константы для заданных условий.

При прогнозировании остаточного ресурса в зависимости от срока эксплуатации силовой кабельной системы применяют два подхода. При малом сроке эксплуатации (относительно нормативного) и незначительной поврежденности силовой кабельной системы используют только информацию о нагруженности. При сроке эксплуатации, близком к нормативному, или значительной поврежденности элементов силовой кабельной системы дополнительно исследуют их степень поврежденности. Преимуществом первого подхода является его меньшая трудоемкость, второго – более точный прогноз и возможность выявления дополнительного резерва ресурса силовой кабельной системы.

В зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют следующие методы прогнозирования: упрощенный, основанный на детерминированных моделях, и уточненный, базирующийся на вероятностных моделях.

В первом методе отклонения контролируемых параметров относят к погрешностям методов контроля, случайным помехам и при прогнозировании остаточного ресурса в расчетах их учитывают с помощью коэффициентов запасов, а во втором методе – их используют в качестве дополнительной информации, что позволяет повысить достоверность прогнозирования.

Для определения возможности достоверного прогнозирования остаточного ресурса силовой кабельной линии, а также выявления наиболее информативных параметров и источников получения исходных данных, необходимых для расчета, проводят анализ условий эксплуатации силовой кабельной системы. Информативными параметрами могут быть значения возникающих повреждений (температура изоляции или механический износ); параметры сопутствующих процессов (токи утечки, уровень ЧР и др.); технологические параметры (температура, расход продуктов и реагентов); показатели качества и эффективности функционирования оборудования (производительность, расход электроэнергии, КПД и т.п.).

При анализе используют имеющиеся источники получения исходных данных для прогнозирования (ведомости дефектов, контрольные карты, диаграммы и др.) или при их недостатке планируют специальные наблюдения за изменением эксплуатационных параметров.

Методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования различают для разных видов повреждений.

Прогнозирование остаточного ресурса СКЛ. Необходимость определения остаточного ресурса ключевого элемента энергосистемы – силовой кабельной сетью возникает при продлении срока ее службы за пределы, нормативного для безопасности ее эксплуатации, а также при планировании периодичности контроля его технического состояния и ремонтов, обеспечивающей надежность и эффективность ее функционирования [13].

Так как в основу работы будут положены методы диагностирования, основанные на температуре, сопротивлении и толщине изоляции, то можно сделать вывод, что для создания прогностической модели состояния СКЛ на основании диагностических данных, полученных под нагрузкой, следует рассматривать экстраполяционные методы (ЭМ) прогнозирования.

Опишем существующие ЭМ. В настоящее время ЭМ прогнозирования являются наиболее проработанными и дающими результат с определяемой величиной погрешности. В основу положено, что процесс изменения переменной является сочетанием двух составляющих - регулярной и случайной:

$$y(x) = f(\bar{a}, x) + n(x), \quad (1)$$

где \bar{a} – вектор коэффициентов в описании процесса; x – переменная; $f(\bar{a}, x)$ – регулярная составляющая (параметрическое семейство функций); $n(x)$ – случайная составляющая.

Исходят из того, что регулярная составляющая (тренд или тенденция) есть гладкая функция от аргумента, в основном от времени, описываемая конечномерным вектором параметров «а». Данные параметры сохраняют свое значение на периоде упреждения. Случайная составляющая $n(x)$ предполагается некоррелированным случайным процессом с нулевым математическим ожиданием. ЭМ базируются на:

- ◆ выделении лучшего описания направления;
- ◆ определении прогнозных значений путем его экстраполяции.

Процесс экстраполяции условно разбит на следующие этапы:

- ◆ постановка задачи, определение гипотез о возможном развитии прогнозируемого объекта, выяснение факторов влияющих на данный объект, определение необходимой экстраполяции и ее допустимой дальности;

- ◆ определение системы параметров, приведение различных единиц измерения к нескольким (как правило, 1-3) на каждый параметр;

- ◆ получение и систематизация данных с проверкой однородности данных и их сопоставимости;

- ◆ определение направления искомых величин с учетом своевременного фиксирования предполагаемых сдвигов, лежащих в начале зарождающихся тенденций.

Определение направления заключается в предварительной обработке числового ряда путем его преобразования с помощью процедур сглаживания и выравнивания для удобства прогнозирования. В результате снижается влияние случайной составляющей и упрощается математическое описание направления.

Используются следующие ЭМ.

1. Экстраполяция на основе среднего значения временного ряда. Предполагается, что средний уровень ряда не имеет тенденции к изменению или если это изменение незначительно.

Доверительные границы для средней:

$$\hat{y}_{t+l} = \bar{Y} \mp t_a S_{\bar{y}}, \quad (2)$$

где t_a – табличное значение t – статистики Стьюдента с $n-1$ степенями и уровнем вероятности p ; $S_{\bar{y}}$ – средняя квадратическая ошибка средней величины.

Среднее квадратическое отклонение для выборки:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где y_t – фактические значения показателя.

Доверительный интервал $t_a S_{\bar{y}}$ учитывает неопределенность, которая связана с оценкой средней величины. Общая дисперсия будет равна $S^2 + S^2/n$. Получим доверительные интервалы для прогностической оценки:

$$\hat{Y}_{t+l} = \bar{Y} \mp t_a S \sqrt{1 + \frac{1}{n}}. \quad (4)$$

Данный метод в нашем случае не является эффективным, т.к. имеет значительную погрешность. Это связано с недооценкой влияния случайных процессов.

2. Экстраполяция по скользящей и экспоненциальной средней. В основном применяется для краткосрочного прогнозирования. Если прогнозируется на один шаг вперед, то $\hat{Y}_{t+l} = M_t$, или $\hat{Y}_{t+l} = N_t$ где M_t – адаптивная скользящая средняя; N_t – экспоненциальная средняя. Доверительный интервал с числом наблюдений n для скользящей средней определяется по формуле (4). Т.к. при расчете скользящей средней m обозначает число членов ряда, участвующих в расчете средней, то заменим n на m , равным нечетным числам. Дисперсия экспоненциальной средней равна $\sigma_e = \frac{a}{2-a} S^2$, где S – среднее квадратическое отклонение. Примем вместо величины $\sqrt{1 + \frac{1}{n}}$ в (4), при исчислении доверительного интервала прогноза, $\sqrt{1 + \frac{a}{2-a}}$ или $\sqrt{\frac{2}{2-a}}$, где a – коэффициент экспоненциального сглаживания, варьируется от 0 до 1. При $0 < a < 0,5$ расчет прогноза учитывают прошлые значения временного ряда, а когда $0,5 < a < 1$ – значения, близкие к периоду упреждения. Ориентировочное значение коэффициента сглаживания найдем по формуле Брауна:

$$a = \frac{2}{m+1}, \quad (5)$$

где m – число уровней временного ряда, входящих в интервал сглаживания.

Данный метод в нашем случае не является эффективным, т.к. модель не позволяет прогнозировать изменение технического состояния оборудования для больших интервалов времени и может использоваться только для краткосрочных прогнозов (на один шаг).

3. Экстраполяция на основе среднего темпа. Если в основу расчета положить средний темп роста, то экстраполируемое значение уровня можно получить с помощью формулы:

$$\hat{Y}_{t+l} = Y_t T_p^l,$$

где T_p^2 – средний темп роста; Y_t – уровень, принятый за базу для экстраполяции.

Принимается путь развития по геометрической прогрессии (экспонентной кривой). Средний темп находится на основе анализа прошлого. В качестве базового уровня для экстраполяции берется последний уровень ряда.

Статистическая надежность вышеприведенных методов определяется с помощью коэффициента вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{y}} \cdot 100\% . \quad (6)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; \bar{y} – среднее значение временного ряда.

Данный метод в нашем случае не является эффективным, т.к. для получения достоверного результата требуется значительная априорная информация, а ввиду случайного характера изменения диагностируемых параметров, возникает высокая погрешность.

4. Однофакторные прогнозирующие функции. В них прогнозируемый показатель зависит только от одного факториального признака. В качестве главного фактора аргумента в основном используют время. Каждому моменту времени соответствуют определенные характеристики всех факториальных признаков, изменяемых во времени. Наиболее простым является экстраполяция направления явления (процесса) за истекший период. Направление есть описание какого-либо процесса очищенного от случайной составляющей. Направление находят путем аппроксимации фактических уровней временного ряда на основе выбранной функции. Для колебательных процессов применяют тригонометрические функции, ряды Фурье.

В качестве прогнозирующей функции в основном используют 3 частных случая: линейную модель, параболу и полином третьего порядка.

Коэффициенты в однофакторных прогнозирующих функциях a_0 и a_1 определяются с помощью метода наименьших квадратов. Он заключается в минимизации суммы квадратов отклонений фактических значений от расчетных:

$$\sum_t (y_t - \hat{y}_t)^2 \rightarrow \min , \quad (7)$$

где \bar{y} – вид исследуемой функции.

Если фактором-аргументом является время t , то прогнозируемые значения показателя y определяется по формуле:

$$y_{t+L}^* = a_0 + a_1(t + L), \text{ где } L = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Фактор-аргумент – независимая переменная (любой показатель x):

$$y_{t+L}^* = a_0 + a_1 x_{t+L}, \text{ где } L = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Метод считается статистически надежным. Именно его мы будем использовать в дальнейшем, т.к. он обладает простотой, использует минимум априорной информации об объекте, все данные для расчета находят в результате диагностики. Данный метод широко применяется в области электротехники и заслужил доверие.

Идеальным случаем решения задачи является адекватное описание изменения функции $\Theta(t)$, каким-либо аналитическим выражением. Ввиду сложности нахождения таких выражений по дискретным точкам целесообразно определить наилучшую структуру аналитического выражения, а при прогнозировании конкретной функции $\Theta(t)$, изменять базовые элементы, входящие в это выражение.

Экстраполяция аппроксимирующей функции. Проведены исследования которые заключались в аппроксимации экспериментальных значений температуры силового кабеля: АПв Пу г-1х30/25-10, следующими функциями.

$$\begin{aligned} \Theta(t) &= A + a \cdot \exp(b \cdot x^n) \\ \Theta(t) &= a / (1 + b \cdot x) + A \\ \Theta(t) &= -a / (b + x) + A \end{aligned} \quad (10)$$

Произведем аппроксимацию полученных экспериментальных данных вышеуказанными функциями. Для нахождения численных значений параметров аппроксимирующей функции будем использовать оптимизацию. При этом минимизируемым значением является среднеквадратичная ошибка и сумма квадратов ошибок. Для этого будем использовать пакет прикладных программ (ППП) MATLAB 7.11. Чтобы определить параметры функций (1), в ППП используем набор инструментов Curve Fitting Tool, результатом работы которого, являются аналитические зависимости и их параметры (табл.1) соответствующие наименьшему значению среднеквадратичной ошибки и суммы квадратов ошибок. В результате аппроксимации экспериментальных данных были получены: экспоненциальная функция (№1), линейная функция (№2) и полином 1-й степени (№3). Для оценки качества прогнозирования были рассчитаны коэффициенты функций и критерии согласия, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Статистические коэффициенты функций

№	Аппроксимирующая функция	Значение коэффициентов функции	Критерий согласия	
			Наименование	Значение полученное /необходимое
1	$\Theta(t) = A + a \cdot \exp(b \cdot x^n)$	$A = 66.69,$ $(65.01 < A < 68.37)$ $a = -38.56,$ $(-40.3 < a < -36.81)$ $b = -5.691e-005,$ $(-6.583 \cdot 10^{-5} < b < -4.8e-005)$ $n = 1.319 (1.289 < n < 1.349)$	SSE (Сумма квадратов ошибок)	0.5213 / 0
			R-square (квадрат смешанной корреляции)	0.9999 / 1
			Adjusted R-square (уточненный квадрат смешанной корреляции)	0.9998 / 1
			RSME (корень из среднего для квадрата ошибки)	0.0982 / 0
2	$\Theta(t) = -a / (b+x) + A$	$A = 95$ (fixedatbound) $a = 1.935e+005,$ $(1.879e+005 < a < 1.99e+005)$ $b = 2792(2694,2890)$	Сумма квадратов ошибок:	37.15 / 0
			Коэффициент корреляции (КК):	0.9894 / 1
			Уточненный КК:	0.9892 / 1
			Среднеквадратичная ошибка:	0.8145 / 0
3	$\Theta(t) = p1 \cdot x + p2$	$p1 = 0.01543,$ $(0.01522 < p1 < 0.01564)$ $p2 = 27.74,$ $(27.54 < p2 < 27.95)$	Сумма квадратов ошибок:	8.82 / 0
			Коэффициент корреляции (КК):	0.9975 / 1
			Уточненный КК:	0.9974 / 1
			Среднеквадратичная ошибка:	0.3969 / 0

где X – независимая переменная.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Из табл. 1 видно, что самую маленькую среднеквадратичную ошибку дает функция, вида $\Theta(t) = A + a * \exp(b * x \wedge n)$.

2. Экспоненциальная функция, вида $\Theta(t) = A + a * \exp(b * x \wedge n)$ является наилучшей для аппроксимации, и ее можно использовать для вычисления оценки установившегося значения температуры, не дожидаясь окончания переходного процесса.

3. Использование предлагаемого подхода позволяет реализовать интеллектуальные устройства измерения тепловых процессов изоляции, учитывающие влияние внешних факторов на процесс измерения и ускоряющие процесс измерения.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик. Доказательством адекватности аппроксимирующей функции является моделирование теплопереноса жилы СКЛ различными методами и сравнение с экспериментальной кривой, рис. 2.

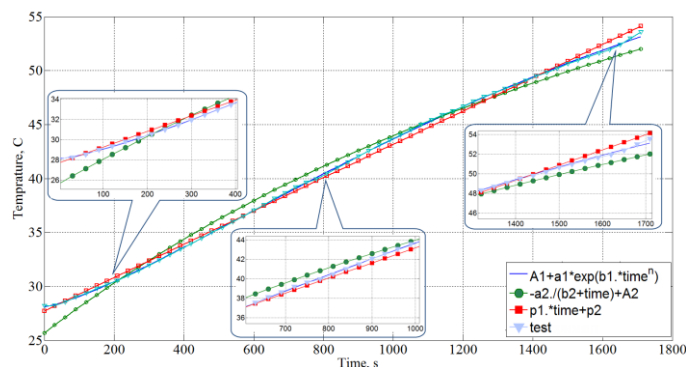


Рис. 2. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик (с экспериментальной кривой)

Таким образом, сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик показал, что из трех (экспоненциальная функция, линейная функция и полином 1-й степени) предложенных аппроксимирующих зависимостей лучшие статистические показатели демонстрирует экспоненциальная функция.

В качестве аппроксимирующей прогнозирующей функции для исследования термофлуктуационных процессов наиболее эффективным является применение экспоненциальной функции, обеспечивающей требуемую точность и автоматизацию. Причем по всем приведенным в табл. 1 параметрам экспоненциальная функция имеет самую маленькую среднеквадратичную ошибку и наилучшее значение по сумме квадратов ошибок, которая в идеальном случае должна стремиться к 0.

Обсуждение и заключение. Проведенный анализ статистики выхода из строя силовых кабельных линий показывает, что существующие методы и регламенты контроля технического состояния СКЛ не позволяют эффективно прогнозировать выход из строя СКЛ и тем самым предотвращать его. Основным диагностическим параметром, позволяющим предотвратить выход из строя СКЛ, является температура изоляции СКЛ. Традиционные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования путем оценки его фактической нагруженности и линейной экстраполяции повреждений до предельно допустимых значений позволяют получить во многих случаях удовлетворительные оценки среднего остаточного ресурса. Однако для получения оценок с требуемой достоверностью необходимо применение методов теории надежности.

Получены аналитические зависимости на основе анализа термофлуктуационных процессов для расчета рациональных параметров электротехнических устройств контроля технического состояния изоляционных материалов кабельных линий под нагрузкой, учитывающие характеристики температуры изоляции.

Работа выполнена при поддержке гранта: Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии, № ВнГр-07/2017-15.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок. Передача электроэнергии. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 160 с.
2. *Полуянович Н.К.* Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. – СПб., 2012.
3. *Полуянович Н.К., Тибейко И.А.* Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. – Таганрог: ЮФУ, 2014. – 406 с.
4. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Электрический привод: учеб. пособие. – Таганрог: ЮФУ, 2015. – 162 с.
5. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Щуровский В.А., Береснев М.А.* Методы экспериментального определения характеристик электрического привода. – Таганрог: ЮФУ, 2016.
6. *Полуянович Н.К.* Энергетическая электроника: пособие по решению задач и методические указания. – Таганрог: ТРТУ, 2001.
7. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Щуровский В.А.* Методы испытания силового электрооборудования. – Таганрог: ТРТУ, 2016.
8. *Дубяго М.Н., Пишихов В.Х., Полуянович Н.К.* Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 230-237.
9. *Горелова В.Л., Мельникова Е.Н.* Основы прогнозирования систем. – М.: Высшая школа, 1986. – 267 с.
10. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3 (46). – С. 25.
11. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихов В.Х.* Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 117-127.
12. *Дубяго М.Н., Н.К. Полуянович.* Термофлуктуационный метод диагностики и прогнозирования изоляционных материалов электроэнергетических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 66-71.
13. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Буланович Д.И.* Прогнозирование состояния изоляции и выявление дефектов в кабельных линиях // В сб.: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Матер. XI всероссийской научно-технической конференции. – 2018. – С. 164-167.
14. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // В сб: Advances in energy, environment and chemical engineering (AEECE 2015) 2015. – P. 49-54.
15. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Burkov D.V.* Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial dis-charge thermal fluctuation theory// Applied Mechanics and Materials. – 2016. – Vol. 2016. – P. 205.
16. *Полуянович Н.К.* Разработка алгоритма релейной защиты распределительной сети на основе математической модели // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 240-245.
17. *Полуянович М.Н., Полуянович Н.К.* Микроконтроллерная система компенсации реактивной мощности // Инженерный вестник Дона. – 2007. – № 2 (2). – С. 77-86.

18. *Рассоха Д.П., Полуянович Н.К.* Моделирование отдельных типов систем электроснабжения // В сб.: Новые информационные технологии в электротехническом образовании (НИТЭ-2003): Матер. конференции. – 2003. – С. 121-125.
19. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Неразрушающий метод прогнозирования остаточного ресурса силовых кабельных линий // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2012. – № 1 (8). – С.27-33.
20. Патент на полезную модель. *RUS 112525 27.04.2011.* Автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий / *Полуянович Н.К., Стульнева А.Н., Дубяго М.Н.*
21. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод селекции сигнала ЧР с помощью Вейвлет-преобразования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 99-104.
22. *Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K.* Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown // *Applied Mechanics and Materials.* – 2015. – Vol. 752-753. – P. 1153-1157.
23. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges // *Advances in Materials Science and Applications.* – 2015. – Vol. 4, No. 1. – P. 23-32.
24. *Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S.* The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development // *Proceedings of x international SAUM conference on systems, automatic control and measurements (SAUM 2010).* – 2010. – P. 265-269.
25. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследования изоляции кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 200-205.

REFERENCES

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok. Peredacha elektroenergii [Rules for electrical installations. Transmission of electricity].* 7th -ed. Мпшыщц: Izd-vo NC ENAS, 2004 160 p.
2. *Poluyanovich N.K.* Montazh, naladka, ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy: ucheb. posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy [Installation, adjustment, operation and repair of power supply systems of industrial enterprises: textbooks for universities]. Saint Petersburg, 2012.
3. *Poluyanovich N.K., Tibeyko I.A.* Ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Operation and repair of power supply systems of industrial enterprises]. Taganrog: YuFU, 2014, 406 p.
4. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Elektricheskiy privod: ucheb. posobie [Electric drive: textbooks]. Taganrog: YuFU, 2015, 162 p.
5. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shchurovskiy V.A., Beresnev M.A.* Metody eksperimental'nogo opredeleniya kharakteristik elektricheskogo privoda [Methods of experimental determination of electric drive characteristics]. Taganrog: YuFU, 2016.
6. *Poluyanovich N.K.* Energeticheskaya elektronika: posobie po resheniyu zadach i metodicheskie ukazaniya [Energy electronics: handbook on the tasks and guidelines]. Taganrog: TRTU, 2001.
7. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shchurovskiy V.A.* Metody ispytaniya silovogo elektrooborudovaniya [Methods of testing of power electrical equipment]. Taganrog: TRTU, 2016.
8. *Dubyago M.N., Pshikhopov V.Kh., Poluyanovich N.K.* Ocenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Assessment and prediction of the insulation materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2015, No. 7 (168), pp. 230-237.
9. *Gorelova V.L., Mel'nikova E.N.* Osnovy prognozirovaniya system [Basics of forecasting systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 267 p.
10. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Termodinamicheskiy sposob vyyavleniya destrukcii izolyatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya resursa kabel'nykh sistem [Thermodynamic method of detection of insulation destruction in the problems of diagnostics and forecasting of cable systems resource], *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering journal of Don]*, 2017, No. 3 (46), pp. 25.

11. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh.* Metod issledovaniya termofluktuacionnykh processov v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya izolyacionnykh materialov [Research method of thermal fluctuation processes in the problems of diagnostics and prediction of insulating materials], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the don state technical University], 2017, Vol. 17, No. 3 (90), pp. 117-127.
12. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Termofluktuacionnyy metod diagnostiki i prognozirovaniya izolyacionnykh materialov elektroenergeticheskikh sistem [Thermal fluctuation method of diagnostics and forecasting of insulating materials of electric power systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics.], 2018, Vol. 61, No. 5, pp. 66-71.
13. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Bulanovich D.I.* Prognozirovanie sostoyaniya izolyatsii i vyyavlenie defektov v kabel'nykh liniyakh [Prediction of insulation condition and identify defaults in cable lines], *V sb.: Informacionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: Mater. XI vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [In the collection: Information technologies in electrical engineering and power engineering materials XI all-Russian scientific and technical conference], 2018, pp. 164-167.
14. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration, *In the collection: Advances in energy, environment and chemical engineering (AEECE 2015) 2015*, pp. 49-54.
15. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Burkov D.V.* Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory, *Applied Mechanics and Materials*, 2016, Vol. 2016, pp. 205.
16. *Poluyanovich N.K.* Razrabotka algoritma releynoy zashchity raspredelitel'noy seti na osnove matematicheskoy modeli [Development of relay protection algorithm for distribution network based on mathematical model], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009 No. 1 (90), pp. 240-245.
17. *Poluyanovich M.N., Poluyanovich N.K.* Mikrokontrollernaya sistema kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Microcontroller system of reactive power compensation], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2007, No. 2 (2), pp. 77-86.
18. *Rassokha D.P., Poluyanovich N.K.* Modelirovanie otdel'nykh tipov sistem elektrosnabzheniya [Modeling of separate types of power supply systems], *V sb.: Nove informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnicheskoy obrazovanii (NITE-2003): Mater. Konferentsii* [In the collection: New information technologies in electrotechnical education (NICE-2003)], 2003, pp. 121-125.
19. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Nerazrushayushchiy metod prognozirovaniya ostatochnogo resursa silovykh kabel'nykh liniy [Non-destructive prediction method of residual life of power cable lines], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer science, computer engineering and engineering education], 2012, No. 1 (8), pp. 27-33.
20. *Poluyanovich N.K., Stul'neva A.N., Dubyago M.N.* Avtomatizirovannaya sistema diagnostiki i kontrolya sostoyaniya izolyatsii silovykh kabel'nykh liniy [Automated system for diagnosis and condition monitoring of insulation of power cable lines]. Patent on utility model. *RUS 112525 27.04.2011*.
21. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Metod selektsii signala CHR s pomoshch'yu Veyvlet-preobrazovaniya [The method of selection of signal CHR with the help of Wavelet transform], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 99-104.
22. *Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K.* Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 752-753, pp. 1153-1157.
23. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges, *Advances in Materials Science and Applications*, 2015, Vol. 4, No. 1, pp. 23-32.
24. *Poluyanovich N.K., Rassokha D.P., Formanyuk V.S.* The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development, *Proceedings of x international SAUM conference on systems, automatic control and measurements (SAUM 2010)*, 2010, pp. 265-269.

25. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Metod amplitudnogo i fazovogo raspredeleniya impul'sov chastichnykh razryadov v zadachakh issledovaniya izolyatsii kabel'nykh liniy [The method of amplitude and phase distribution of the pulses of the partial time-series in the objectives of the study isolation of cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 200-205.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. профессор А.А. Лаврентьев.

Полюянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail:w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 550.343.3+550.34.016

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-98-110

А.С. Черепанцев

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА*

В основе предлагаемой модели лежит анализ применимости концепции возникновения самоорганизованного критического состояния в диссипативной системе взаимодействующих дискретных элементов (модель Олами-Федера-Кристенсена) к системе дискретных блоковых структур, находящихся в напряженном состоянии и формирующих систему разрывов при достижении в отдельном элементе параметром состояния критического значения. Возникающий разрыв формирует возмущение поля напряжений в окружающей области и тем самым может служить источником возникновения разрыва в соседнем элементе и т.д. Эволюция такой диссипативной системы во времени определяется приращением на каждом временном шаге приращениями компонент напряжений на заданную величину. Это позволяет моделировать различные типы нагружения. В качестве критерия возникновения разрыва рассмотрен критерий Кулона формирования сдвигового разлома. Для ограничения возможных напряжений сжатия, критерий дополнен параметром предельного напряжения сжатия. Эволюционная двумерная модель развития системы дислокаций рассчитывает каталог дискретных событий, включающий время, координаты, угол, амплитуду дислокации. Вместе с тем расчетная модель выводит и непрерывные ряды вариаций таких параметров как средняя упругая энергия, средняя деформация всей системы блоков или ее части на каждом шаге эволюции. Проведенный расчет модели одноосного сжатия позволил оценить важнейшие свойства пространственной и энергетической организации разломных структур в критическом состоянии. В качестве таких параметров рассмотрены степенные показатели распределения дислокаций по размеру b , в пространстве d , а также фрактальная размерность поверхности разлома δ . Показано, что данные параметры динамической системы взаимодействующих дислокаций связаны соотношением $d = b \cdot \delta$. Достоинством рассмотренной модели описания как наблюдаемых свойств пространственно-временного развития разломных структур в натуральных условиях, так и экспериментальных данных по разрушению образцов в лабораторных условиях, является задание физически понятного взаимодействия отдельных блоков с помощью перераспределения напряжений при возникновении разрыва.

Модель OFC; сдвиговая дислокация; критерий разрушения Кулона; динамическая система.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-00185-а.